



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Sandra Saar**

**SMEAR EESTI SEIREJAAMA PÕHIMASTI  
NEELUALADE ANALÜÜS JA PUISTUTE  
KIRJELDUS**  
AN ANALYSIS AND DESCRIPTION OF FLUX  
FOOTPRINT AREA OF SMEAR ESTONIA MAIN  
TOWER

Magistritöö  
Loodusvarade kasutamise ja kaitse õppekava

Juhendajad: dotsent Ahto Kangur, PhD  
vanemteadur Steffen M. Noe, PhD

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Sandra Saar		Õppekava: Loodusvarade kasutamine ja kaitse	
Pealkiri: SMEAR Eesti seirejaama põhimasti neelualade analüüs ja puistute kirjeldus			
Lehekülgi: 48	Jooniseid: 25	Tabeleid: 8	Lisasid: 3
Õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool Bio-ja keskkonnateadused, B430	
Juhendajad:		Ahto Kangur, Steffen M. Noe	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu, 2018	
<p>Turbulentse kovaratsiooni meetodil tehtud mõõtmised on Eestis uudsed. Varasemalt tehtud mastimõõtmised on keskendunud pigem temperatuuri, sademete jt tunnuste mõõtmiseks. SMEAR Eesti jaama põhi infrastruktuur valmis 2015. aastal ning praeguseks on saadud huvitavaid tulemusi nii taimestiku süsinikusidumise kui ka taimede ja õhukvaliteedi seoste kohta.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärk on kirjeldada Eesti SMEAR jaama olemust ja eesmärki ning seletada lahti turbulentse kovaratsiooni meetoodika rakendamisest tuleneva neeluala arvestamise põhimõtted. Kirjeldati ka SMEAR Eesti jaama põhimasti ümbritsevad neelualad ning uuriti nende alade sisse jäävaid puistud.</p> <p>Töös on kasutatud SMEAR Eesti jaama Apna masti mõõteandmeid, kus on kogutud õhuturbulentsi andmeid 30 meetri kõrguselt ning 70 meetri kõrguselt. Mõõtetulemused jäävad 2 aastase perioodi sisse. Puistuelementide analüüsis on kasutatud riikliku Metsaregistri ning Järvelja Metsamajandamise Infosüsteemi andmeid.</p> <p>Töö tulemusena on välja töötatud meetoodika neelualale jäävate metsaeraldiste valikuks kasutades selleks mõõtmistulemustest arvatud neeluala signaale. Seda meetoodikat on võimalik kasutada vastavalt vajadusele erinevatel ajaperioodidel olnud neeluala hindamiseks. Töö tulemusi saab kasutada nn dünaamilise neeluala arvutuse jaoks.</p>			
Märksõnad: SMEAR Eesti, neeluala analüüs, turbulentne kovaratsioon, eraldisepõhine kirjeldus, neeluala majandamine			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master’s Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Sandra Saar		Curriculum: Natural Resources Management	
Title: An analysis and description of flux footprint area of SMEAR Estonia main tower			
Pages: 48	Figures: 25	Tables: 8	Appendixes: 3
Chair: Chair of Forest Management Planning and Wood Processing Technologies			
Field of research and (CERC S) code: Natural Sciences, B430			
Supervisors: Ahto Kangur, Steffen M. Noe			
Place and date: Tartu, 2018			
<p>The measurements done with eddy covariance method are novel in Estonia. Previously made environmental weather measurements focus on measuring temperature, rainfall and other features. The main infrastructure of the SMEAR station in Estonia was completed in 2015 and has received interesting new results in both carbon linking as well as connections between plants and air quality.</p> <p>The purpose of this Master’s Thesis is to describe the essence and purpose of the Estonian SMEAR station as well as to explain the flux footprint principles derived from utilization of the eddy covariance method. Flux footprints surrounding the SMEAR stations main tower were also described and stands remaining in the that area were studied.</p> <p>The paper uses measuring data of Apna main tower, which collected air turbulence data from heights of 30 and 70 metres. The data covers a two year period. The data from National Forest Register (Metsaregister) and the Forestry Infosystem of Järvselja (Järvselja Metsamajandamise Infosüsteem) were used to analyse stand elements.</p> <p>As a result of the paper a method for the selection of forest stand compartments in the flux footprint areas using flux footprint signals that were calculated from the tower data, was developed. This method can be used to appraise flux footprints from different time periods according to the need. Results can be used for the so-called dynamic flux footprint calculation.</p>			
Keywords: SMEAR Estonia, analyzing flux footprint, eddy covariance, forest stand compartment description, management of flux footprint			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
1.KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	7
1.1. Smear võrgustik .....	7
1.1.1. Smear Eestis .....	8
1.1.2. Turbulentse kovaratsiooni meetod .....	14
1.2. Neeluala.....	16
1.2.1. Neeluala arvutamise mudelid .....	19
2. MATERJAL JA METOODIKA .....	21
2.1. Andmed .....	21
2.2. Andmetöötlus .....	21
3. TULEMUSED .....	24
3.1. Neeluala kirjeldus 30-meetri kõrguselt mõõtepunktist .....	24
3.2. Neeluala kirjeldus 70-meetri kõrguselt mõõtepunktist .....	29
4. ARUTELU .....	36
KOKKUVÕTE .....	38
VIIDATUD ALLIKAD .....	40
LISAD .....	43
Lisa 1. Anemomeeter METEK uSonic Class A.....	44
Lisa 2. Gaasianalüsaator IRGASON .....	45
Lisa 3. Skript neelualade arvutamiseks .....	46

## SISSEJUHATUS

Arusaam metsast, metsa omandist, majandamisest ning kasutamisest on aja jooksul muutunud sedamööda, kuidas on kasvanud ühiskondlikud teadmised ja üldine heaolu (Korjus *et al* 2015).

Seoses kasvuhoonegaaside pideva muutumisega on suurenenud vajadus pidevate CO<sub>2</sub> monitooringute järele, mis võimaldaks kasvuhoonegaasidega seotud andmeid koguda ülemaailmselt (Jain 2009). Kliima muutusi mõjutavad tänapäeval lisaks looduslikele teguritele ka antropogeensed tegurid, mis on suurendanud kasvuhoonegaaside uurimise vajadust. Et aga kliimamuutusi usaldusväärselt ennustada, on tarvis ka kõrgetasemelist tehnoloogiat, mis võimaldaks teostada pidevat keskkonna analüüsi (Collins 2013).

Uurimaks metsaökosüsteemis toimuvaid kasvuprotsesse ja muutumist ajas on tänases teadusmaailmas kasutada kolm peamist uurimismetoodikat: püsiproovitükkide pikaajalistel mõõtmisandmetel põhinev kasvu jälgimine ja analüüs; dendrokronoloogiline aegridade analüüs ja turbulentse kovaratsioonil põhinev ainevoogude mõõtmisandmete analüüs (Metsaranta & Lieffers 2009).

Turbulentse kovaratsiooni mõõtmised on Eestis küllaltki uudsed. Varasemad mastimõõtmised Eestis on pigem olnud keskkonna ja kliima tunnuste mõõtmiseks, kus on tunnuste (temperatuur, sademed, õhurõhk jt) arvestuspõhimõtte suunatud ajaperioodi kohta keskmistamisele. Kovaratsiooni puhul mõõdetakse signaalis olevat ainevoogu ja voos olevate ainete kontsentratsioone ning seetõttu on väga oluline teada millise tekkega on liikuvad õhumassid ning millist mõju avaldab mõõtepunkti lähiümbrus.

Eesti SMEAR-jaam rajati peamiselt pikaajaliste ja komplekssete andmeridade kogumiseks, mis omakorda on vajalikud põhjuse ja tagajärje seoste leidmiseks aastati varieeruvate ilma- ja õhutingimuste korral. Sellised seosed on hädavajalikud tulevikutrendide ennustamiseks (Niinemets 2018). Sellisel tasemel tehtud mõõtmiste väärtus mitmekordistub ajas, tuleviku ennustamiseks on oluline mõõtmiste pikkade aegridade olemasolu.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on kirjeldada Eesti SMEAR jaama olemust ja eesmärki ning seletada lahti turbulentse kovaratsiooni metoodika rakendamisest tuleneva neeluala arvestamise põhimõtted. Töö uurimuslikus pooles valiti Apna mõõtejaamalt kahelt kõrguselt – 30 meetrit ja 70 meetrit - kogutud andmed, et koostada vastav neelualade kaart ning uurida, millised puistud jäävad nende neelualade sisse.

# 1.KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Smear võrgustik

SMEAR ehk *Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations* on Helsingi Ülikooli teadlaste eestvedamisel välja ehitatud mõõtejaamade võrgustik, mille eesmärgiks on jälgida atmosfääri ja metsaökosüsteemi vahelisi suhteid boreaalses kliimavööndis (Hari & Kulmala 2005).

SMEAR-jaamade uuringuvaldkondade põhisuunad on:

- Biosfäär - aerosool, pilved
- Biokeemilised tsüklid: süsinik, vesi, fosfor, lämmastik
- Gaasiliste ja tahkete heitmete ning osakeste analüüs ja nende roll pilvede moodustumises
- Mulla uuringud määramaks vee, süsiniku ja teiste toitainete osakaalu ning liikumist
- Analüüsid puu ja ümbritseva keskkonna vahelise gaasi ja veevahetustes

(SMEAR 2018)

Soomes on neli jaama ning nende paigutus järgib põhja-lõunasuunalist gradienti (joonis 1).



**Joonis 1.** Soomes paiknevate SMEAR jaamade asukohad (SMEAR 2018)

Esimene SMEAR jaam loodi 1991. aastal Lapimaa idanurgas, et mõõta õhureostust, mida emiteeris Kola poolsaarel olev kaevandus. Esimesed mõõtmised keskendusid vaid vääveldioksiidi tuvastamisele, kuid jaam on töökorras tänapäevalgi ning kogub andmeid atmosfääri ja kliima kohta. Teine SMEAR jaam püstitati aastal 1995. 128 meetrit pika mastiga mõõtejaam paikneb 55-aastase hariliku männi (*Pinus sylvestris*) puistus. Jaam tegeleb peamiselt atmosfääri, taimefüsioloogia, aerosooli ja pinnase uuringutega. Kolmas SMEAR jaam püstitati aastal 2004. aastal Helsinki linna piirile, et uurida suure inimhõlgu ala ja ümbritseva metsaökosüsteemi omavahelist koosmõju. Jaamas mõõdetakse enamasti radiatsiooni ning erinevaid ainevoogusid. Neljas SMEAR jaam avati 2009. aastal ning peamine eesmärk on uurida aerosoolide ja pilvede vahelisi seoseid (SMEAR 2018).

### 1.1.1. Smear Eestis

SMEARi põhimõtteid järgivaid ökosüsteem-atmosfäär-terviku mõõtmisi on Eestis Järveljal läbi viidud 2008. aastast alates (Noe *et al.* 2011).



SMEAR Eesti mõõtejaam on Eesti Teaduse Teekaardi projekti „Keskonnaobservatoorium“ üks osa. Tegemist on Eesti Maaülikooli, Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli, Tallinna Ülikooli, Tartu Observatooriumi ja Keskonnaagentuuri ühise keskkonnaseire alase infrastruktuuriprojektiga (SMEAR 2018).

2015. aastal sai Eesti SMEAR-mõõtejaama esimese etapi ehitus ja peamine seadmestamine valmis ning Eesti jaamast sai kogu SMEAR võrgustiku kõige lõunapoolsem osa, võimaldades uurida ka hemi-boreaalset metsaökosüsteemi, mis erineb seniste Soome SMEAR jaamade puhul uuritud boreaalsetest metsadest (vt joonis 2).



**Joonis 2.** SMEARi võrgustik koos Eesti SMEAR jaamaga (Noe *et al.* 2017).

Eesti SMEAR-mõõtejaam asub Eesti Maaülikooli Järvselja Õppe- ja Katsemetskonnas ning jaguneb kahe uurimisala vahel: Apna peamine uurimisala ja Liispõllu esmane mõõteala. Apna masti koordinaadid N:58,277638 E:27,308247 (joonis 3) ning Liispõllu masti koordinaadid N:58,27093 E:27,27045.

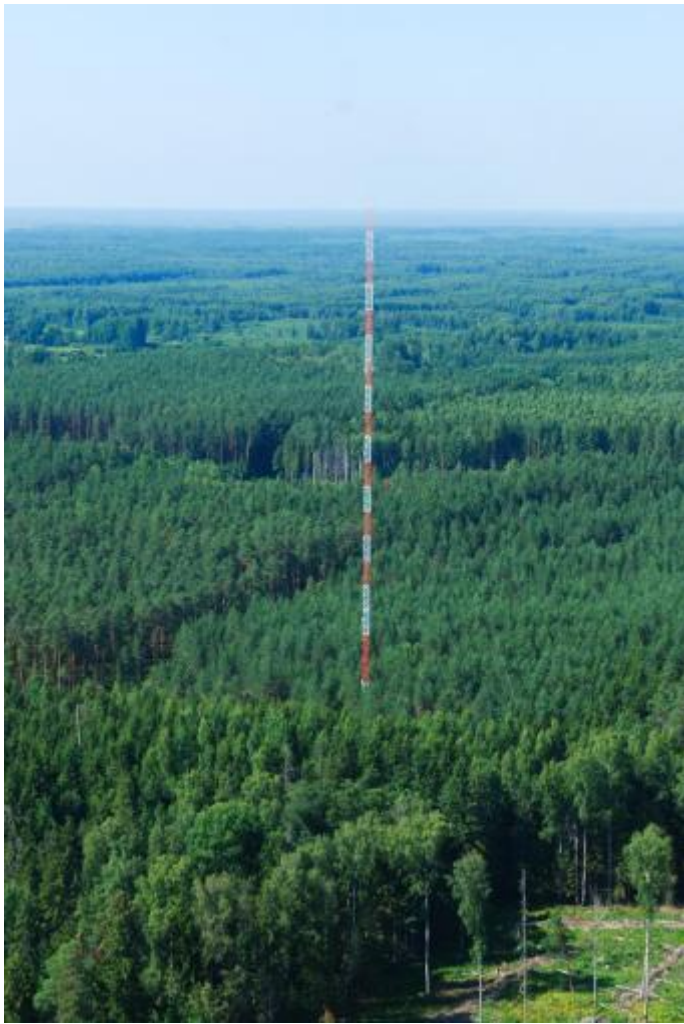


**Joonis 3.** Ortofoto Apna 130-meetri kõrgusest tornist (Maa-ameti geoportaal, 2018).

Apna uurimisalal paiknevad peamised tugistruktuuri rajatised, nagu mõõtejaama maja (joonis 4), aerosoolimajake, plats koos kuue teisaldatava konteinerjaama ühendusliidesega ning peamised mõõteobjektid – 130-meetrine seadmemast (joonis 5) ja kaks 30-meetrist võramasti. Liispõllu mõõtealal paikneb 24-meetrine võramast ning seda toetav seadmemajake. Apna alal on püsiv internetiühendus ning elektriliidesed kuni 380 volti, Liispõllu alal on internetiühendus saavutatav GSM modemiga ning 220-voldine elektriühendus (Noe *et al* 2015).



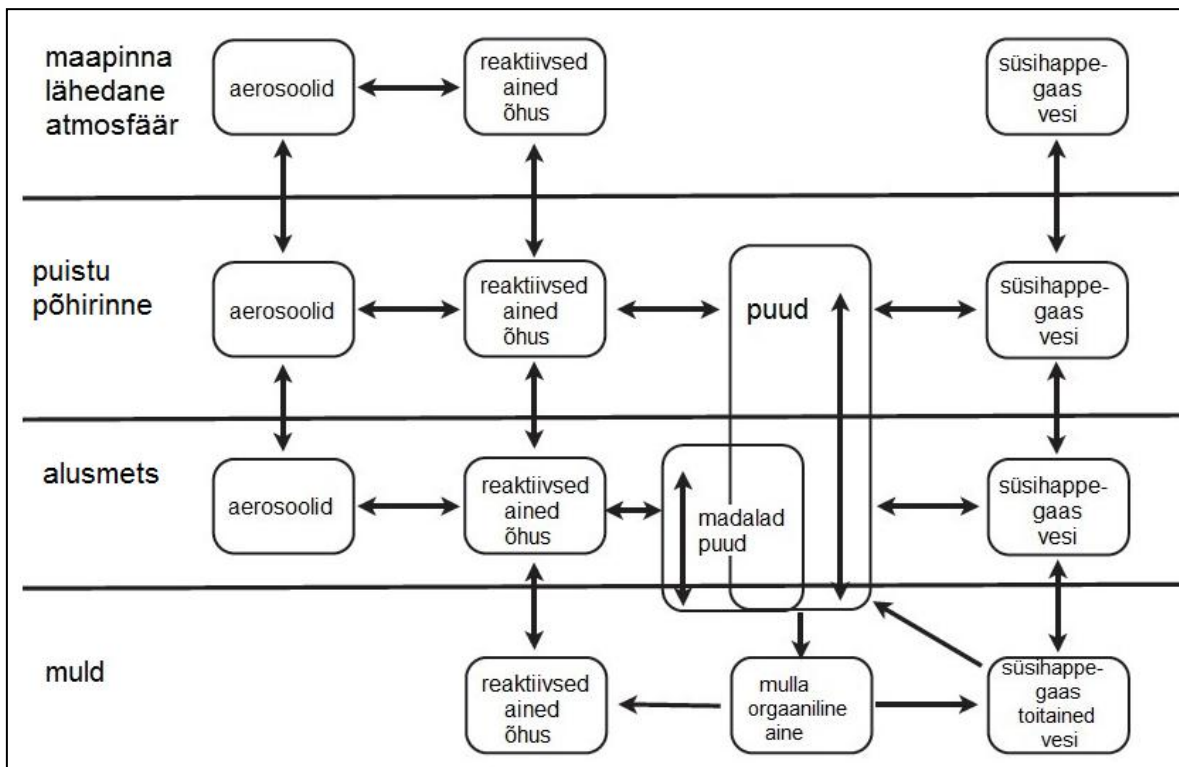
**Joonis 4.** Apna mõõtejaama maja (SMEAR Estonia 2018).



**Joonis 5.** 130 meetri kõrgune seadmemast (SMEAR Estonia 2018).

Eestis on segametsade osakaal suur ning meie metsad erinevad Soome metsadest nii alusmetsa suure tagavara kui ka puude võrade vertikaalse struktuuri poolest. Segude teket soodustab ka praegune metsamajandamise tendents, mis liigub püsimeetsanduse suunas. Erineva metsastruktuuri tõttu on ka Eesti SMEAR-jaama mõõtmispõhimõtted (joonis 6) erinevad Soome jaamadest, kuna meie metsad on heterogeensemamad ning rindeid esineb puistutes rohkem (Noe *et al* 2015).





**Joonis 6.** SMEAR Eesti mõõtmispõhimõtete skemaatiline joonis (autori modifitseeritud joonis, põhineb Noe *et al* 2015).

Joonisel 6 olevad kastid viitavad mõõtmistega seotud materiale ning nooled materiat muutvatele ja mõõtejaamas mõõdetavatele protsessidele. Kõik süsteemi osad on erinevate keemiliste, bioloogiliste ja füüsikaliste protsesside kaudu omavahel vahetult seotud ühtselt toimivaks ja mõõdetavaks kompleksseks tervikuks. Mõõtmised tehakse nii maapinna lähedases atmosfääris, erinevatel kõrgustel puistus kui ka mullas (Noe *et al* 2015). Maapinna lähedase atmosfääri alla on mõeldud puude võrade ülemist osa ja seal edasi, kust õhukeerised oluliselt enam edasi ei tungi.

SMEAR jaam võimaldab koguda tähtsaimate kasvuhoonegaaside - süsihappegaasi ( $\text{CO}_2$ ), metaani ( $\text{CH}_4$ ) ning veeauru ( $\text{H}_2\text{O}$ ) andmeid viielt eri kõrguselt – 30m, 50m, 70m, 90m, 110m. Turbulentset õhuliikumist mõõdab anemomeeter METEK uSonic Class A (joonis 7 ja lisa 1). Süsihappegaasi voogu mõõdetakse ökosüsteemi tasandil, kasutades turbulentse kovariatsiooni meetodit (Baldocchi 2003) ning mõõtmised tehakse 30m ja 70m kõrguselt maapinnast, mõõtevahendiks on infrapuna gaasianalüsaator IRGA (lisa 2). Gaasianalüsaator on suletud tüüpi ning seda kasutatakse  $\text{CO}_2$  ja  $\text{H}_2\text{O}$  voogude mõõtmiseks. Õhk imetakse analüsaatorisse läbi meetri pikkuse toru, mille diameeter on 6 mm. Mõõtmiste salvestamissagedus on 10 Hz ehk 10 mõõtmist sekundis (Burba & Anderson 2010).



**Joonis 7.** Anemomeeter METEK uSonic Class A (SMEAR Estonia 2018).

SMEAR jaamas saadud mõõtmistulemused on kasutatavad keskkonnaseires atmosfääri aerosoolide, lisand- ja saastegaaside foonikontsentratsioonide hindamisel Eestis ja võimaldavad vähendada kliimamudelite määramatust ning kontrollida võimalikku aerosooliprotsesside kasvuhoooneefekti leevendavat mõju. SMEAR tüüpi uurimisjaam on kavandatud aine ja energia voogude uurimiseks atmosfäär-taimkate-muld üleminekul erinevates ajalis-ruumilistes mastaapides, keskkonnaprobleemide lahendamiseks, kasutades automatiseeritud, pidevaid ja pikaajalisi keskkonnaparameetrite mõõtmistulemusi (SMEAR Eesti...2018).

### **1.1.2. Turbulentse kovaratsiooni meetod**

Õhuvoogude mõõtmised hoogustusid alates 1990ndatest aastatest, mil juurutati kvaliteetseid, kuid taskukohaseid instrumente ning rakendati *eddy covariance* ehk turbulentse kovariatsiooni tehnikat (Vesala *et al* 2008).

See on väga levinud meetodiks süsinikuringe mõõtmisel. Turbulentse kovariatsiooni mõõtmiste abil saab lisaks süsiniku voogudele mõõta ka õhus olevate veeosakeste voogusid ja temperatuuri (Wang & Davis 2008). Meetod võimaldab kirjeldada

ökosüsteemi füsioloogiat ning salvestada mõõtmistulemusi tundidest aastateni ja seda väga suurel alal. Samas tuleb korrektsete ja usaldusväärsete andmete saamiseks turbulentsete kovariatsioonide meetodit kasutades arvestada teatud piirangutega ning olla teadlik mõõtmistel tekkivate vigade võimalusega (Baldocchi 2003).

Meetod võimaldab määrata ka näiteks keskkonnateguritest tulenevat mõju ökosüsteemile läbi süsinikdioksiidi bilansi uurimise (Baldocchi 2003). See on aidanud kaasa ökosüsteemide füsioloogia kirjeldamisel ja uurimisel uute ja täpsemate mõõtmistehnicate väljaarendamisele. Meetodi peamiseks tugevusteks on uuritava ala suurus ehk jalajälg, mis võib ulatuda mõnest sajast meetrist mitmete kümnete kilomeetriteni, ning samuti ajaline tegur: ökosüsteemi gaasivoogusid on võimalik mõõta turbulentsete kovariatsioonide meetodil aastaringselt ning pikaajaliselt – tundidest mitmete aastateni (Burba 2013). Samas kui näiteks kambermõõtmistel on uuritava ala suurus piiratud ja ka kordades väiksem (Noe *et al.* 2015).

Turbulentse kovariatsiooni meetod on üks kõige täpsemaid meetodeid globaalsete muutuste tuvastamiseks (Rebmann *et al.* 2005). Meetod on väga kasulik ökosüsteemide tundmaõppimisel ja ökofüsioloogiliste seoste mõistmisel, kuna süsihappegaasi näitaja vähenemine või suurenemine aitab mõista keskkonnas toimuvaid muutusi (Baldocchi 2003).

Viimase 5 aasta jooksul on turbulentse kovariatsiooni meetodi kasutamine jõudnud sellesse punkti, kus tänu tarkvara ja tehnoloogia arengule saab metoodikat väga efektiivselt kasutada välitingimustes (Burba *et al.* 2013).

Turbulentse kovariatsiooni meetodit arendatakse eesmärgiga püüda parandada tulemusi mõõtes ökosüsteemi produktiivsust, fotosünteesi ja hingamise aktiivsust (Tang *et al.* 2003).

## 1.2. Neeluala

Voogude mõõtmist kasutatakse, et hinnata vee ja süsihappegaasi muutust õhus. Voog iseloomustab seda, kui palju osakesi liigub kindlal maa-alal, kindlas ajavahemikus. Voog sõltub: 1) kui palju osakesi läbib ala, 2) ala suurusest ja 3) kui palju võtab aega ala läbimine (Burba & Anderson 2010). Voogude mõõtmiseks püstitatakse puudest piisavalt üle ulatuvaid mõõtmismaste ning jälgitakse ka mullahingamist, lehtede-okaste langemisel tekkivat varist jms.

Õhuvoogu saab kirjeldada kui horisontaalset õhu liikumist, mis koosneb väga paljudest erineva suurusega pööristest (joonis 8). Esmapilgul võib olukord tunduda väga kaootilisena, aga need komponendid on tornist väga kergesti mõõdetavad. Igale pöörisele on omane 3D koostisosa, kaasaarvatud vertikaalne liikumine õhus. Instrumendid suudavad ka väiksemad muutused tuvastada (Burba & Anderson 2010).



**Joonis 8.** Horisontaalne õhuvool, mis koosneb väga paljudest erineva suuruse ja suunaga pööristest (Burba & Anderson 2010).

Pööriste suund ja kiirus võib muutuda väga tihti. Ühel hetkel pööris langetab õhku, teisel hetkel aga juba tõstab seda. Muutuv on ka tuule kiirus. Igal osal õhust on oma eripära, näiteks gaasi kontsentratsioon, temperatuur ja niiskus. Kui mõõdame neid karakteristikuid ja vertikaalse õhu liikumise kiirust, siis saame teada tõusvate ja langevate voogude gaasi kontsentratsiooni, temperatuuri ja niiskuse (Burba & Anderson 2010).

Turbulentsi mõju on seda suurem, mida ebaühtlasem on puude võrade pind (nt häilud metsas).



Neeluala (*flux footprint*) on ala, mis jääb mõõtejaama „nägemisvälja“. Ehk see on ala, mis jääb vastavalt puhuvate tuulte suunale vastutuult ning mõõtejaam registreerib kõik erinevad vertikaalsed turbulentsi vood, mis jäävad selle ala sisse. Neeluala kaugust mõõtejaamast kirjeldatakse ka inglisekeelse terminiga „*fetch area*“. Neeluala suurus sõltub mõõtmisjaama kõrgusest, pinna karedusest (*surface roughness*) ning termilisest stabiilsusest (*thermal stability*) (Burba & Anderson 2010).

Pinna karedus ehk *roughness* on maa ja puude võrade pinna üldine ebatasasus, mis juhtub, kui tuule liikumisele jäävad takistusena ette erinevad (maakasutus) elemendid, näiteks puud ja hooned (Burba & Anderson 2010).

Mida rohkem on neelualal „väljaulatavaid osi“, seda nn karedam on tema pind. Näiteks metsad on karedamad kui tundrad. *Roughness length* ehk kareduse pikkus on vertikaalsete tuuleprofiilide valemite kasutatav parameeter ning on võrdne kõrgusega, kus tuule keskmine kiirus muutub teoreetiliselt nulliks. See on kõrgus, kus tuul ei liigu enam matemaatilise logaritmi loogika järgi. See parameeter on oluline tegur urbaniseeritud keskkonnas, kus pilvelõhkujad ja teised kõrghooned avaldavad mõju kareduse sügavusele ning tuule mustritele (Guide to Meteorological...2008).

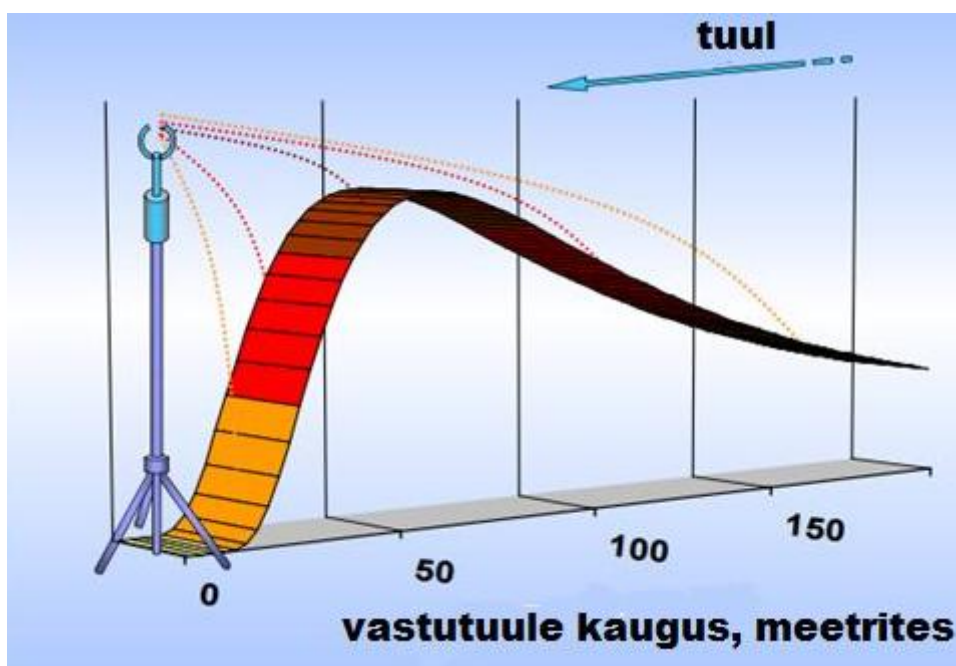
Pinna kareduse uladust on tihti keeruline visuaalselt hinnata. Umbkaudse hinnangu järgi moodustab kareduse ulatus ühe kümnendiku kareda objekti enda kõrgusest. Näiteks madal rohi kõrgusega 0,01 m omab kareduse uladust umbes 0,001 m. Pinnareljeefid jagatakse Davenporti (1960) järgi klassidesse, allpool on toodud tabel (tabel 1) erinevate pinnareljeefide kareduste pikkustest ( $Z_0$ ), mõõtühikuks on meeter (m).

**Tabel 1.** Pinnareljeefide klassifikatsioon Davenporti (1960) järgi (Guide to Meteorological...2008)

Klass	Pinnareljeefi kirjeldus	$Z_0$ (m)
1	Avameri	0,0002
2	Mõõnarannad, lumi, vegetatsioon puudub, takistused puuduvad	0,005
3	Avatud madal reljeef, rohi, mõned üksikud takistused	0,03
4	Madalad põllukultuurid, juhuslikud suured takistused	0,10
5	Kõrged põllukultuurid, laiali hajutatud takistused	0,25
6	Pargid, põõsad, arvukad takistused	0,5
7	Äärelinn ja metsad	1,0
8	Kesklinn, erinevate kõrgustega rohked hooned	2

Termiline stabiilsus tähendab olukorda, milles oma asukohast kujuteldavalt vertikaalsihis väljaviidud õhuelement püüab esialgsesse asendisse tagasi minna. Kui esialgsest asendist väljanihutatud õhuelement jätkab liikumist esialgsest asendist üles või alla, siis on tegemist ebastabiilse atmosfääriga. Täiesti stabiilses atmosfääris vertikaalne liikumine ehk konvektsioon puudub. Stabiilsus on üldiselt seda suurem mida väiksem on atmosfääri vertikaalne temperatuurigradient (Eerme 1997).

Kui mõõtejaama kõrgus ning pinna karedus jäävad samas, siis termilise stabiilsuse muutumisel võib neeluala suurus märgatavalt laieneda. Väga ebastabiilsete tingimuste puhul jääb neeluala 50 meetri raadiusesse, neutraalilähedastes tingimustes on neeluala 5-250 meetrit mõõtejaamast ning väga stabiilsete tingimuste puhul jääb neeluala 15-500 meetrit mõõtejaamast (Burba & Anderson 2010).



**Joonis 9.** Neeluala sõltuvus mõõtmispunkti kõrgusest ja kaugusest (Burba & Anderson 2010) (Autori modifitseeritud joonis).

Joonisel 9 on visuaalselt kujutatud neeluala toimumine. Mida tumedam on joonisel punane värv, seda suurem on panus, mis sellelt alalt tuleb. Seega võib väita, et enamik voogude allikaid mõõtmiste tarbeks ei tule päris mõõtejaama ligidalt ega ka kilomeetrite kauguselt, vaid pigem keskelt. Mida kõrgemalt toimub mõõtmine ning mida väiksem on

pinna karedus, seda kaugemalt levivad osakesed omavad olulist osa mõõdetavas voogmõõtmistes ning seda laiemaks muutub neeluala (Burba & Anderson 2010).

### 1.2.1. Neeluala arvutamise mudelid

Neeluala arvestamise mudeleid kasutatakse mõõtejaamade tulemuste interpreteerimisel, et ennustada neelualade ulatust. Seirevõrgustike suurenemisega on tekkinud vajadus usaldusväärsete ja täpsete neeluala arvutamise mudelite järele. Kuigi viimaste aastate jooksul on välja töötatud mitu täiustatud neeluala arvutamise mudelit, pole enamusi neist siiski võimalik rakendada pikkade ajaseeria andmete peale, sest arvutuskäigud on programmide jaoks liiga nõudlikud (Kljun 2004).

Neelualade ning muude voogude arvutamiseks on palju mudeleid, millest ülevaate annab tabel 2. Käesolevas töös vaatab autor lähemalt nendest kahte – Schuepp ja Kljun.

**Tabel 2.** Ülevaade kõige olulisematest neeluala arvutamise mudelitest (Vesala *et al* 2010) järgi

Autor	Aasta	Märkused
Pasquill	1972	Esimene neeluala arvutamise mudel ning neeluala idee
Schuepp	1990	Lisati neutraalne kihistumine ja keskmistatud tuulekiirused
Leclerc & Thrutell	1990	Lagrangian neeluala mudel
Horst & Weil	1992	Ühe dimensiooniline neeluala mudel
Baldocchi	1997	Neeluala mudel metsades
Strong	2004	Neeluala mudel aktiivsete keemiliste ühenditega
Kljun <i>et al</i>	2004	Kolme dimensiooniline Lagrangian mudel

Lihtsad analüütilised mudelid, nt Schuepp (1990), on nüüdseks laialdaselt kasutusel ning hästi integreeritud ka turbulentsse kovariatsiooni programmidesse. Arvestama peab, et Schuepp mudel (vt valem 1) eeldab neutraali lähedasi tingimusi. Tuule kiirus ei sõltu kõrgusest ning difusioon kasvab lineaarselt vastavalt kõrgusele.

$$P(x) = \frac{u(z-d)}{u_* k x^2} e^{-\frac{u(z-d)}{u_* k x}} \quad (1)$$

kus:

P - panus voogu, %

u - keskmine tuule kiirus, m/s

x – kaugus mõõtejaamast, m

u\* - hõõrdumise kiirus (*friction velocity*), m/s

z - mõõtmispunkti kõrgus, m

d – neutraalnivoo (*zero plane displacement*), kõrgus, kus keskmine tuule kiirus on määratud nulliks, tänu kasvavale takistusele (hooned, puud), m ,

k – von-Kármán konstant (0.4)

Ülaltoodud Schueppi neeluala arvutamise mudel on üks enimkasutatavaid mudeleid. Lähteandmeid kasutades saab selle mudeliga arvutada, millistelt kaugustelt tulevad mõõdetud vood (Burba & Anderson 2010).

Kljun (2004) kolmetasandiline neeluala arvutamise mudel (vt valem 2) on kasutusel ka EddyPro programmi neeluala arvutamise mudelite seas ning oli kasutuses käesoleva magistritöö valmimises. Kljuni mudel prognoosib voogude asukohta ja olulisust 80%-lise tõenäosusega, võttes arvesse mõõtejaama kõrguse, pinna kareduse ning termilise stabiilsuse. Mudeliga ennustatud väärtus väljendub vahemaas - anemomeetrist selles suunas, kust tuleb kõige suurema suhtelise panusega individuaalne voog (Kljun 2004).

$$x_{max} = X_{*} , z_m \left( \frac{\sigma_{\omega}}{u_{*}} \right)^{-0.8} \quad (2)$$

kus:

X<sub>max</sub> - maksimaalne kaugus, kust tuleb signaal, m

X\* – kaugus mõõtejaamast, m

z<sub>m</sub> – mõõtejaama kõrgus, m

u\* - hõõrdumise kiirus (*friction velocity*), m/s,

σ<sub>w</sub> – külgsuunalise kiiruse vaheldumise standardhälve (*standard deviation of lateral velocity fluctuations*), m/s

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

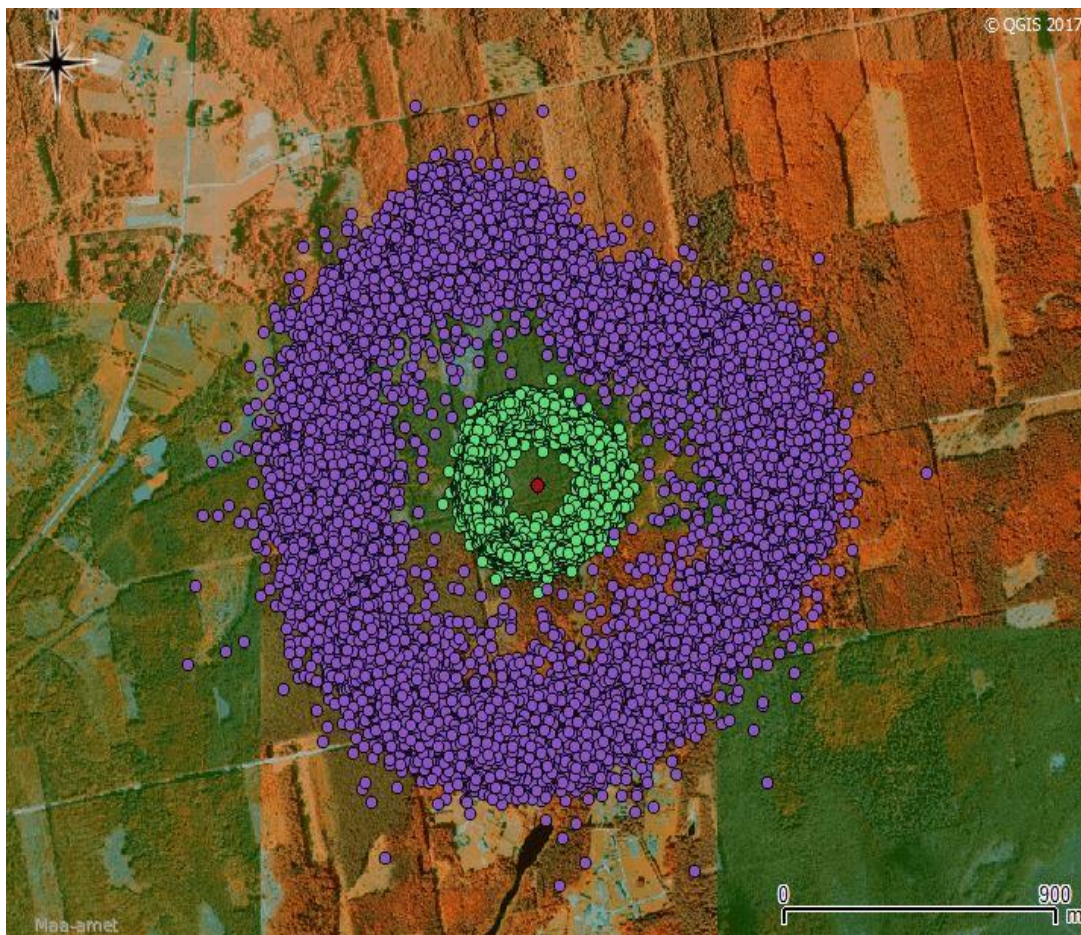
### 2.1. Andmed

Andmed on kogutud SMEAR jaama Apna mastilt, mis kogub õhuturbulentsi andmeid 30 meetri kõrguselt ning 70 meetri kõrguselt. Mõõtetulemused jäävad 2 aastase perioodi sisse. 30 meetri kõrguselt tehtud mõõtmised on ajavahemikus aprill 2014 kuni detsember 2016 ning 70 meetri kõrguselt tehtud mõõtmised on ajavahemikus juuni 2014 kuni oktoober 2016.

### 2.2. Andmetöötlus

Algseid SMEAR jaama andmeid töödeldi vabavaralise statistikatarkvaraga R (*R Development Core Team 2011*). Algsed failid enne töötlust olid csv. formaadis. Iga fail sisaldas mõõtmistulemusi keskmistatult 30 minuti kohta. Eemaldatud said puudulike mõõtmistulemustega read. Igale mõõtmistulemusele lisati SMEAR-masti koordinaadid (x: 694022.3 ja y: 6464443.0) ning arvutati tuulesuunda kasutades neelualade signaalide koordinaadid. Arvutuskäigu skript on välja toodud lisas 3.

Kaardiprogrammina kasutati vabavaralist GIS-tarkvara *Quantum GIS (QGIS)*, kus kasutati aluskaardina Maa-ameti Eesti metsandusliku ortofoto kaardikihti. Sinna lisati Järvelja kvartalite ja eraldiste kaardikihid Järvelja Metsamajandamise Infosüsteemi kodulehelt. Kaardikihtidele lisati eelnevalt arvutatud neelualade ulatuse signaalid, eraldi 30 meetri kõrguselt tehtud mõõtmiste (edaspidi 30M neeluala) ja 70 meetri kõrguselt tehtud mõõtmised (edaspidi 70M neeluala), neelualade koordinaadid on näha joonisel 10. Pildil on violetsete punktidega märgitud 70M neeluala signaalid, roheliste punktidega 30M neeluala signaalid ning punase punktiga on tähistatud SMEAR Apna mõõtejaama asukoht.



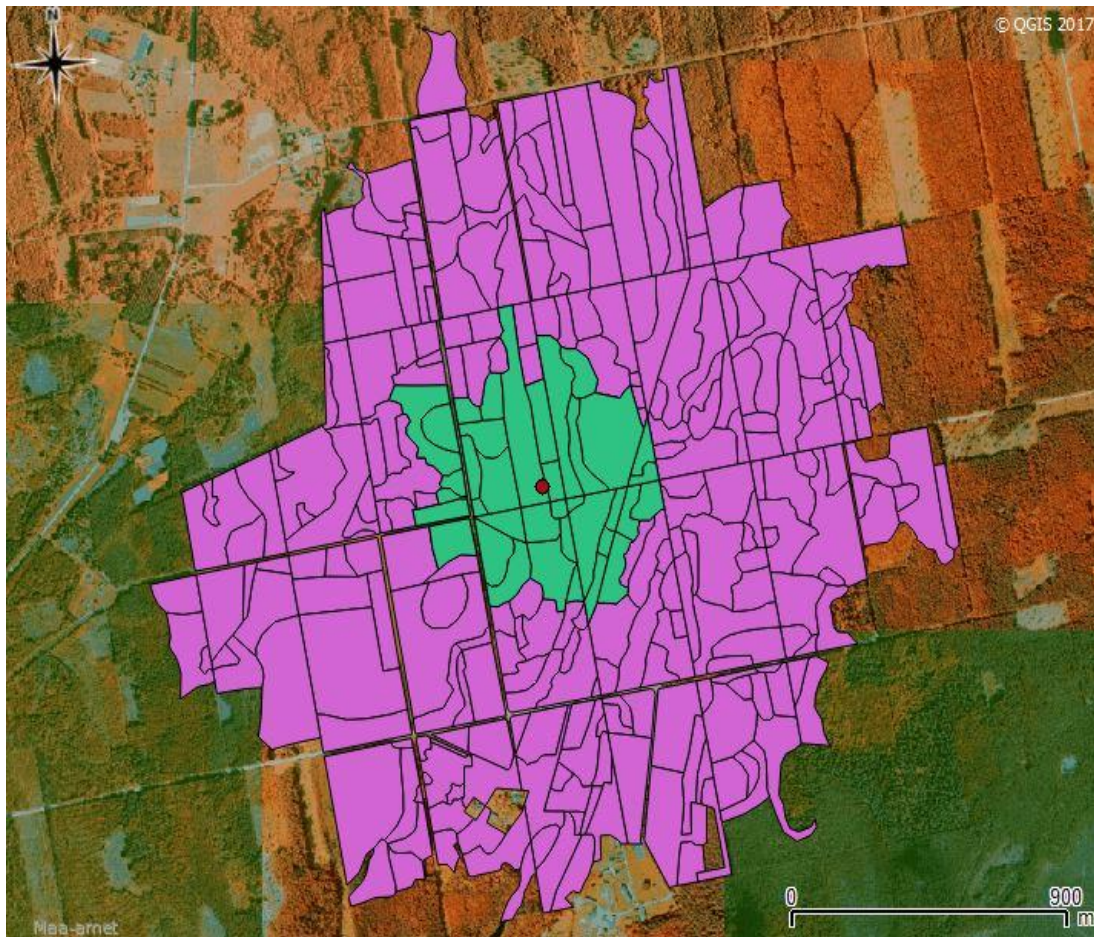
**Joonis 10.** 30M ja 70M neeluala ulatuse signaalide paiknemine Apna mõõtejaama peamasti suhtes.

Et teada saada, milliste eraldiste sisse mõlema mõõtmise neelualad jäävad, kasutati *QGISi* erinevaid andmeohje ning geoprotsessi töövahendeid, et luua vähimad ümbritsevad polügonid, mida saaks siduda Järvelja eraldiste kaardikihiga. Peale kaardikihtide sidumist moodustati kaks eraldistekihti (joonis 11), vastavalt 30M ja 70M neelualadele. Joonisel 11 on rohelisega märgitud eraldised 30M neeluala ning violetsega eraldised 70M neelualal. Punase punktiga on tähistatud SMEARi mõõtejaama asukoht. Neelualadel olevad eraldised otsiti välja, kasutades Metsaregistri andmestikku ning Järvelja Metsamajandamise Infosüsteemi andmestikku. Metsaregistri andmed on seisuga 01.05.2018. Vajalike eraldiste kättesaamiseks kasutati *Visual FoxPro* andmetöötlusprogrammi. Eraldiste andmed kanti üle *MS Excelisse*, kus toimus ka hilisem andmete analüüs.

Oluline on välja tuua, et Järvelja Metsamajandamise Infosüsteemi eraldiste ning kvartalite kaardikihte on viimati uuendatud 20.07.2016, kuid riikliku Metsaregistrisse on kantud andmeid ka peale seda, seega on juhuseid, kus *QGISi* kaardil olev eraldis on tänaseks nii-



õelda „tükeldatud“ või saanud teise kuju. Seetõttu kontrolliti kõikide eraldiste andmed üle nii Järvelja MMI kui ka Metsaregistri andmetabelitest ning tehti vastavad täiendused ja parandused.



**Joonis 11.** 30M (roheline) ja 70M (violetne) neeluala sisse jäävad eraldised, punasega on tähistatud SMEAR jaama Apna mõõtemasti asukoht.

Töös olevate graafikute ja tabelite tegemiseks kasutati *MS Excelit*. Puistukirjeldustes jäeti välja eraldised, mille maakategooria oli „muu maa“.

### 3. TULEMUSED

#### 3.1. Neeluala kirjeldus 30-meetri kõrguselt mõõtepunktist

Antud ala koosneb neljakümnest eraldisest kuult erinevalt Järvelja Õppe-ja Katsemetskonnas paiknevas kvartalilt (JS222, JS223, JS224, JS238, JS239 ja JS240). Neeluala kogupindala on 46,54 hektarit, millest kaitstav pindala on 23,4% ehk 10,87 hektarit (vt tabel 3). Kaitse all olev osa asub metsamaal ning kaitse põhjuseks on veekogu ranna või kalda piiranguvöönd. Eraldis, mille maakategooria on „muu maa“, on ühtlasi ala, kus paikneb Apna mõõtmisjaam koos lähedalasuva tugihoonega – kvartal JS223, eraldis number 19.

**Tabel 3.** 30M neelualal paiknevate eraldiste maakategooriate ülevaade

Nimetus	Eraldisi	Pindala (ha)	Kaitstav ala (ha)
Tootlik metsamaa	39	46,14	10,87
Muu maa	1	0,4	0
<b>Kokku</b>	<b>40</b>	<b>46,54</b>	<b>10,87</b>

Neelualale jääv metsamaa on jagatud üheksa erineva kasvukohatüübi vahel. Kõige enim eraldisi on mustika kasvukohatüübiga, järgnevad jänesekapsa-mustika ning jänesekapsa-kõdusoo tüübirühma metsad (tabel 4).

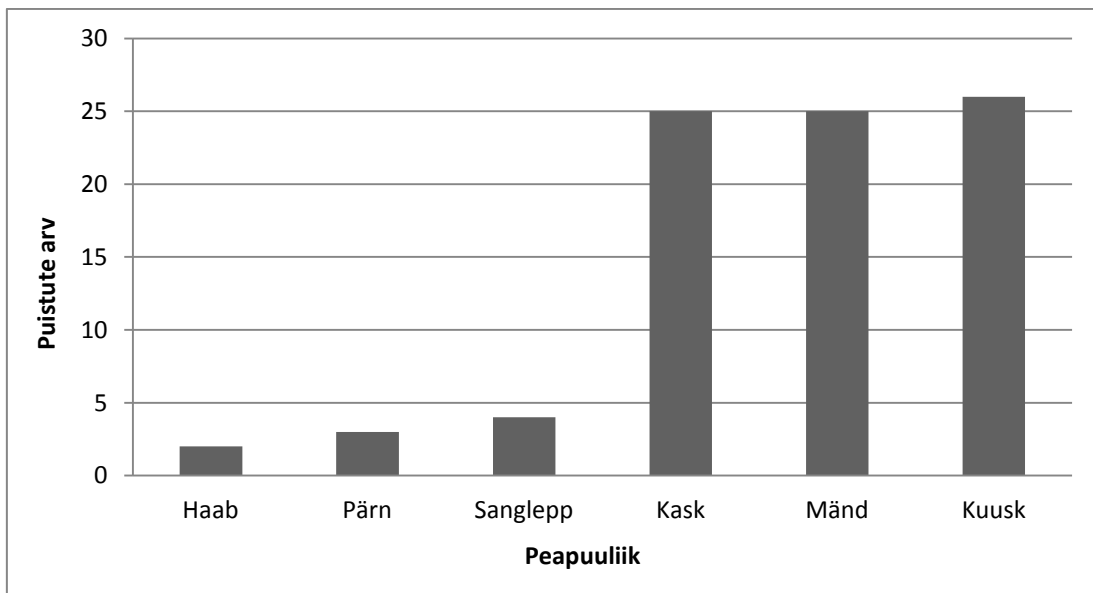
**Tabel 4.** Kasvukohatüüpide jaotus 30M neeluala metsamaal

Nimetus	Eraldiste arv	Pindala (ha)
Mustika	14	18,27
Jänesekapsa-mustika	9	9,51
Jänesekapsa-kõdusoo	8	5,58
Sinika	3	5,39
Jänesekapsa	1	4,88
Karusambla-mustika	1	1,44
Karusambla	1	0,37
Naadi	1	0,49
Siirdesoo	1	0,21
<b>Kokku</b>	<b>39</b>	<b>46,14</b>

Analüüsi ka neelualal olevate eraldiste esimese ja teise rinde puistuid, võttes vaatluse alla puuliikide vanusejaotuse ja kõrgusjaotuse enamuspuuliigi järgi.

Esimese rinde liigilist koosseisu on võimalik näha jooniselt 12.

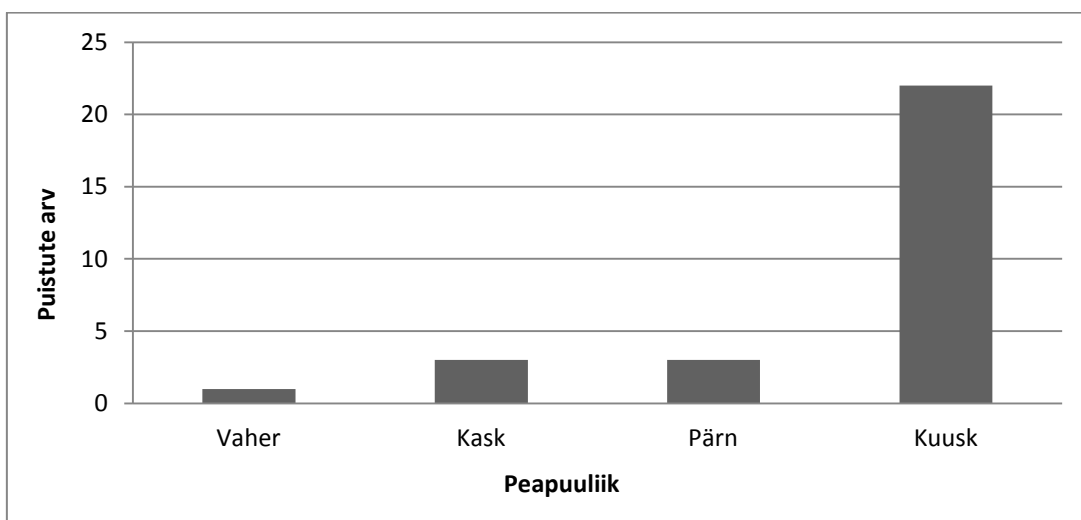




**Joonis 12.** Esimese rinde puistute liigiline koosseis 30M neelualal.

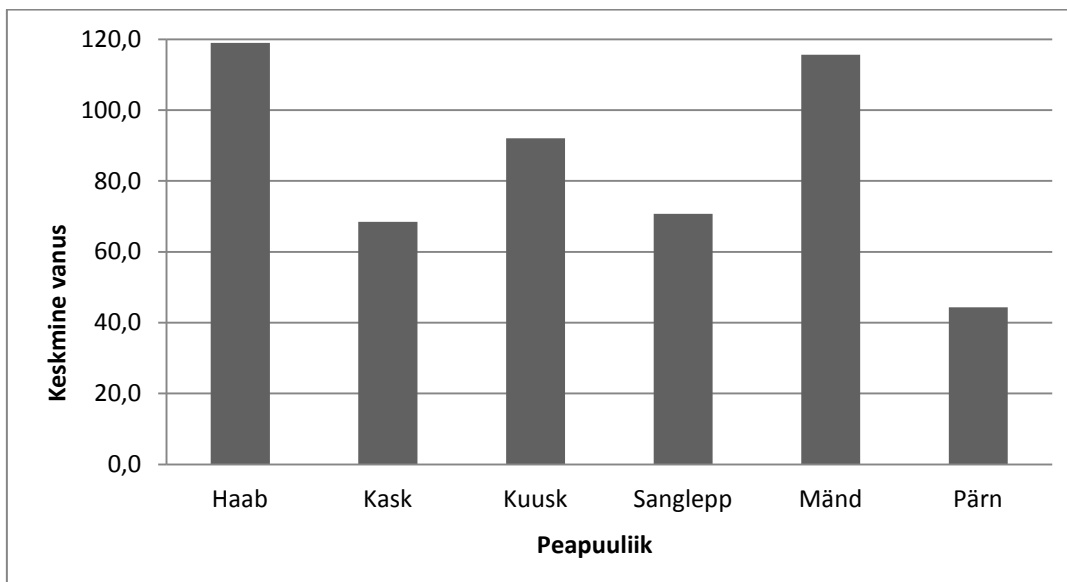
Kokku on esimeses rindes esindatud 85 puistut, kõige rohkem on esindatud harilik kuusk 26 puistuga, kask 25 puistuga ning harilik mänd samuti 25 puistuga. Leidub veel sanglepa 4 puistut, pärna 3 puistut ning 2 haavikut.

Teine rinn esineb 29 puistuga, kus kõige rohkem on kuuske 22 puistuga, kaske ja pärna on mõlemat esindatud kolmel korral. Ühel korral on esindatud ka vahtra puistu (joonis 13).



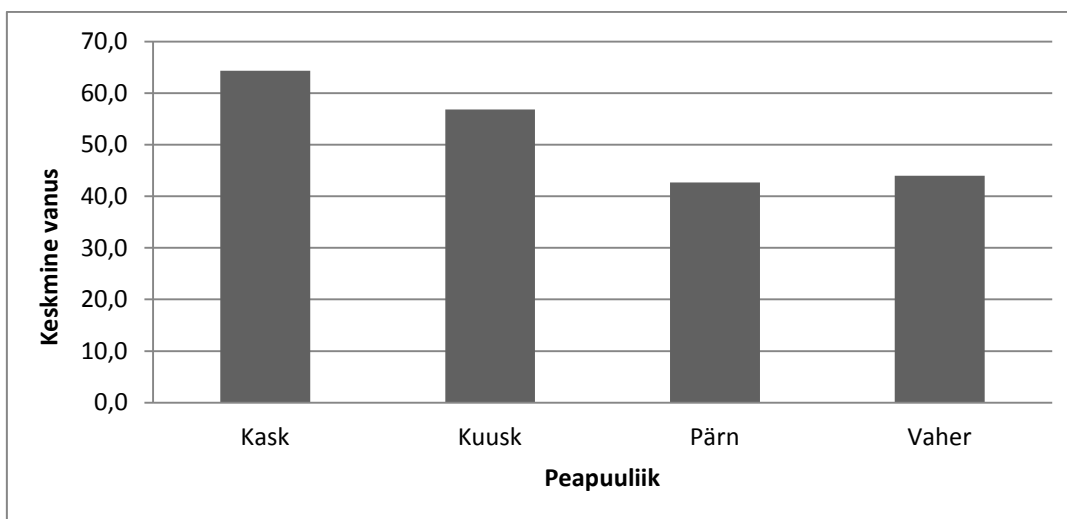
**Joonis 13.** Teise rinde puistute liigiline koosseis 30M neelualal.

Esimese rinde kõikide puistute keskmine vanus on 85 aastat. Puuliikide järgi on kõrgeima keskmise vanusega haab (119 aastat), kuigi alal esines vaid kaks haava puistut ja mänd (115,6 aastat) ning madalaima vanusega kask (68,5 aastat) ning pärn (44,3 aastat) (joonis 14).



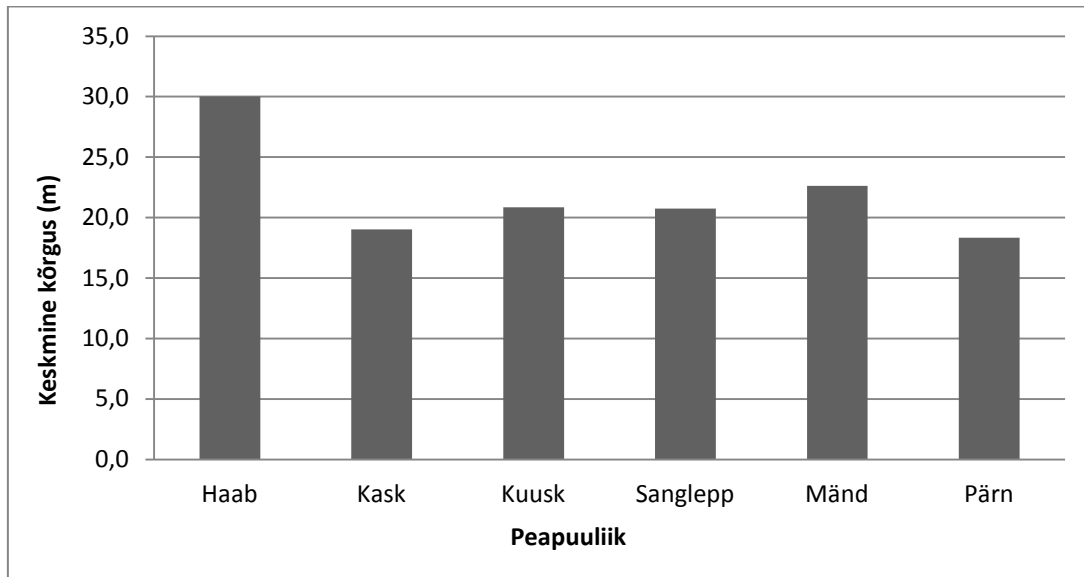
**Joonis 14.** 30M neeluala esimese rinde puistute keskmine vanus puuliikide kaupa

Teise rinde kõikide puistute keskmine vanus on 52 aastat. Kõrgeima keskmise vanusega on kask (64,3 aastat) ning madalaimaga vaher (44 aastat) (joonis 15).



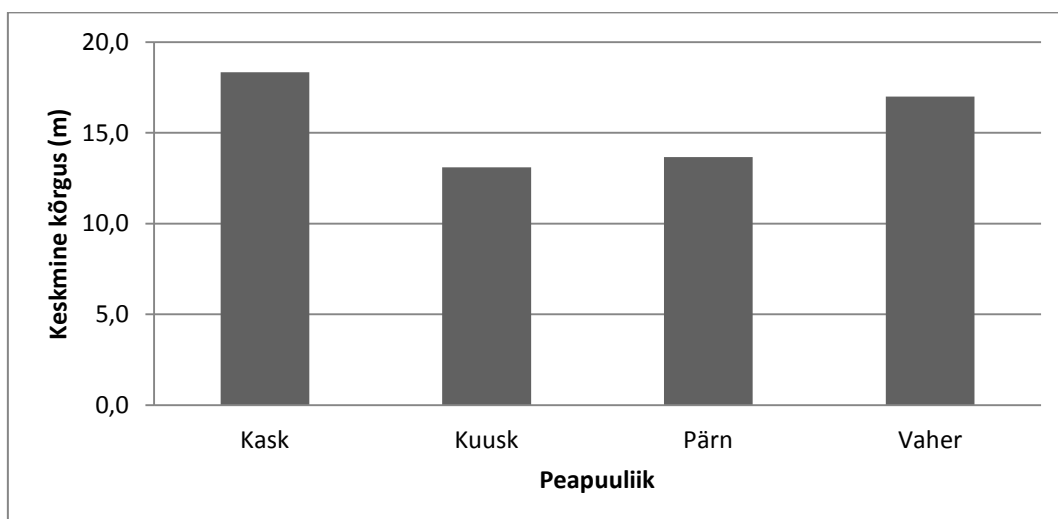
**Joonis 15.** 30M neeluala teise rinde puistute keskmine vanus puuliikide kaupa

Esimese rinde kõikide puistute keskmine kõrgus küündib 21,9 meetrini. Puuliikide järgi on keskmiselt kõige kõrgemad haava (30 meetrit) ja männi (22,6 meetrit) enamusega puistud, lühimaks jäid pärna (18,3 meetrit) enamusega puistud (joonis 16).



**Joonis 16.** 30M neeluala esimese rinde puistute keskmine kõrgus puuliikide kaupa

Teise rinde puistute keskmine kõrgus on 15,5 meetrit. Puuliikide järgi on keskmiselt kõige kõrgemad kase (18,3 meetrit) ning madalaimad kuuse (13,1 meetrit) enamusega elemendid (joonis 17).



**Joonis 17.** 30M neeluala teise rinde puistuelementide keskmine kõrgus puuliikide kaupa

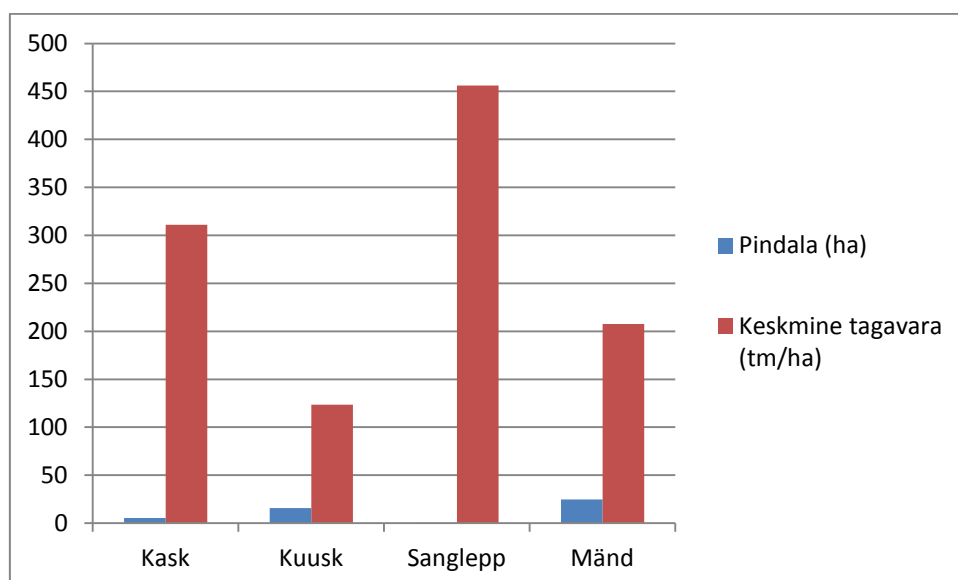
Keskmine tagavara (tm/ha) on arvatatud kogu neelualas olevate puistuelementide peale, peale esimese ja teise rinde on arvesse võetud ka üksikpuude rinne, surnud puit ja lamapuit

(vt tabel 5). Kogu tagavara kokku on 8988 tihumeetrit, sellest ~57% moodustavad männi enamusega puistud, mille tagavara kokku on 5129 tm. 21% kogu peapuuliikide tagavarast moodustavad kuusikud tagavaraga 1951 tm. Väikseima tagavaraga on sanglepa enamusega puistud, millede tagavara kokku on 228 tm.

**Tabel 5.** 30M neeluala puistute pindala ja tagavara peapuuliigi järgi

peapuuliik	pindala (ha)	esimene rinne (tm)	teine rinne (tm)	üksikpuude rinne (tm)	surnud puit (tm)	lamapuit	keskmise tm/ha
Kask	5,4	1472	182	3	16	7	311,1
Kuusk	15,8	1661	123	112	40	15	123,5
Sanglepp	0,5	228	0	0	0	0	456
Mänd	24,7	4579	469	51	18	12	207,6
<b>Kokku</b>	<b>46,4</b>	<b>7940</b>	<b>774</b>	<b>166</b>	<b>74</b>	<b>34</b>	<b>193,7</b>

Suurima keskmise hektaritagavaraga puistuteks on aga sanglepad enamusega puistud oma väikese pindala kuid suure esimese rinde tagavara tõttu, mis loob keskmiseks tagavaraks hektari kohta 456 tm/ha. Järgnevad kase enamusega puistud tagavaraga 311,1 tm/ha ning männikud keskmise tagavaraga 207,6 tm/ha. Kõige väiksema keskmise tagavaraga, 123,5 tm/ha, on kuuse enamusega puistud. Keskmised tagavarad koos kogupindaladega puuliikide järgi on välja toodud joonisel 18.



**Joonis 18.** 30M neeluala puistute pindala ja keskmine tagavara peapuuliikide järgi

### 3.2. Neeluala kirjeldus 70-meetri kõrguselt mõõtepunktist

Antud neeluala sisse jääb 313 eraldist, millest 297 eraldist paiknevad Järvelja Õppe-ja katsemetskonnas ning ülejäänud 16 eraldist asuvad eramaal. Selle neeluala sisse jäävad ka 30M neeluala sees olevad eraldised.

70M neeluala hõlmab enda alla peaaegu kümme korda suurema ala, kui 30M neeluala - 422,47 hektarit, millest kaitstav pindala on 144,47 hektarit (vt tabel 6). Suurema enamuse moodustab tootlik metsamaa, kuid neeluala sisse jääb ka looduslikke rohumaid, õuemaad, parke, veekogusid. Kogu kaitse all olevast alast jääb 69,36 hektarit kaitseala sihtkaitsevööndi, 43,01 hektarit piiranguvööndi ning 30,23 hektarit alast jääb veekogu ranna või kalda piiranguvööndi. Metsamaast on 35,20% alast kaitse all, mis kitsendab metsa majandamise planeerimist.

**Tabel 6.** 70M neelualal paiknevate eraldiste maakategooriate ülevaade

Nimetus	Eraldisi	Pindala (ha)	Kaitstav ala (ha)
tootlik metsamaa	291	398,61	140,33
looduslik rohumaa	6	9,14	3,95
õuemaa	4	5,43	
park	3	4,21	
veehoidla, tiik	3	1,02	0,42
järv	2	1,6	
põllumaa	1	0,74	
põõsastik	1	0,17	
taimla	1	1,15	
muu maa	1	0,4	
<b>Kokku</b>	<b>313</b>	<b>422,47</b>	<b>144,7</b>

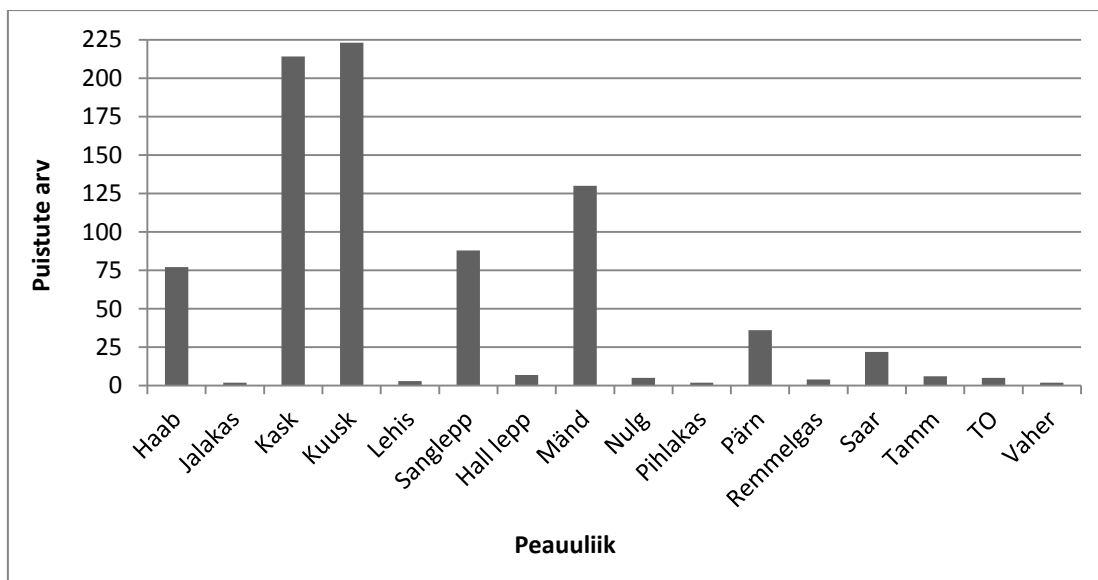
Neelualas olev metsamaa on jagatud viieteistkümne erineva kasvukohatüübi vahel. Kõige rohkem eraldisi on jänesekapsa-mustika kasvukohatüübiga, järgnevad naadi, mustika ning jänesekapsa-kõdusoo tüübirühma metsad (tabel 7). Kõige vähem on esindatud tarna-angervaksa, karusambla ning madal soo kasvukohatüüpidega metsad.

**Tabel 7.** Kasvukohatüüpide jaotus 70M neeluala metsamaal

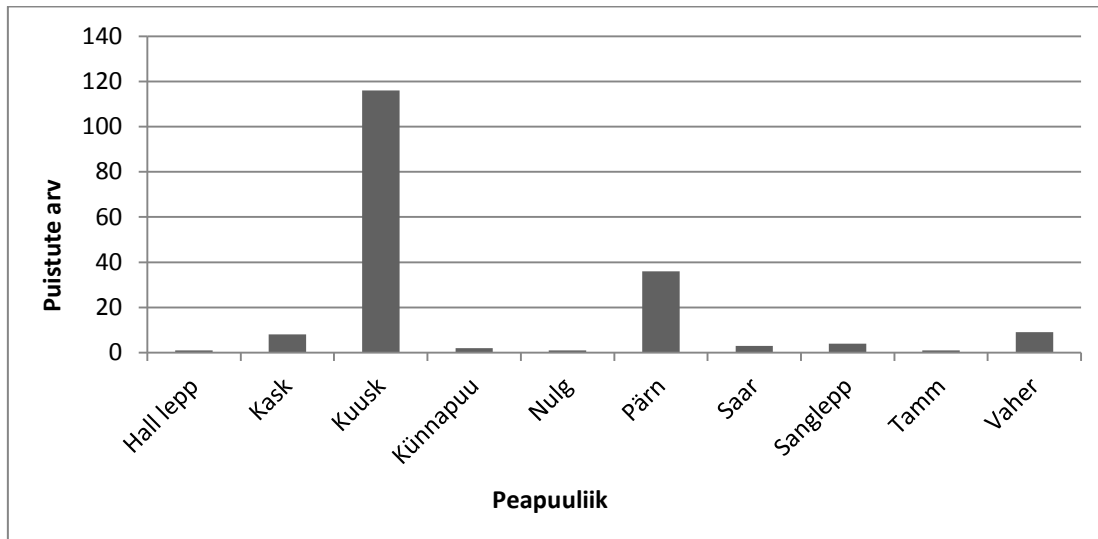
Nimetus	Eraldiste arv	Pindala (ha)
jänesekapsa-mustika	79	85,8
naadi	50	69,0
mustika	49	70,8
jänesekapsa-kõdusoo	37	47,8
angervaksa	23	34,5
jänesekapsa	18	23,3
mustika-kõdusoo	9	21,5
siirdesoo	9	24,7
sinika	5	7,2
karusambla-mustika	3	4,4
lodu	3	3,1
sõnajala	2	2,7
tarna-angervaksa	2	1,8
karusambla	1	0,4
madalsoo	1	1,9
<b>Kokku</b>	<b>291</b>	<b>398,6</b>

Analüüsti ka neeluala esimese ja teise rinde puistuid, võttes vaatluse alla puuliikide vanusejaotuse, kõrgusjaotuse enamuspuliigi järgi ning tagavara puistuelementide järgi.

Liigilist koosseisu on näha jooniselt 19. Kokku on esimeses rindes esindatud 826 puistuelementi, kõige rohkem on esindatud kuusikud, kaasikud ja männikud. Järgnevad sanglepp, haab, pärn, saar. Vähe on esindatud hall lepp, tamm, nulg, remmelgas, lehis, jalakas, pihlakas, vaher ning teised okaspuud (märgitud lühendiga “TO”).

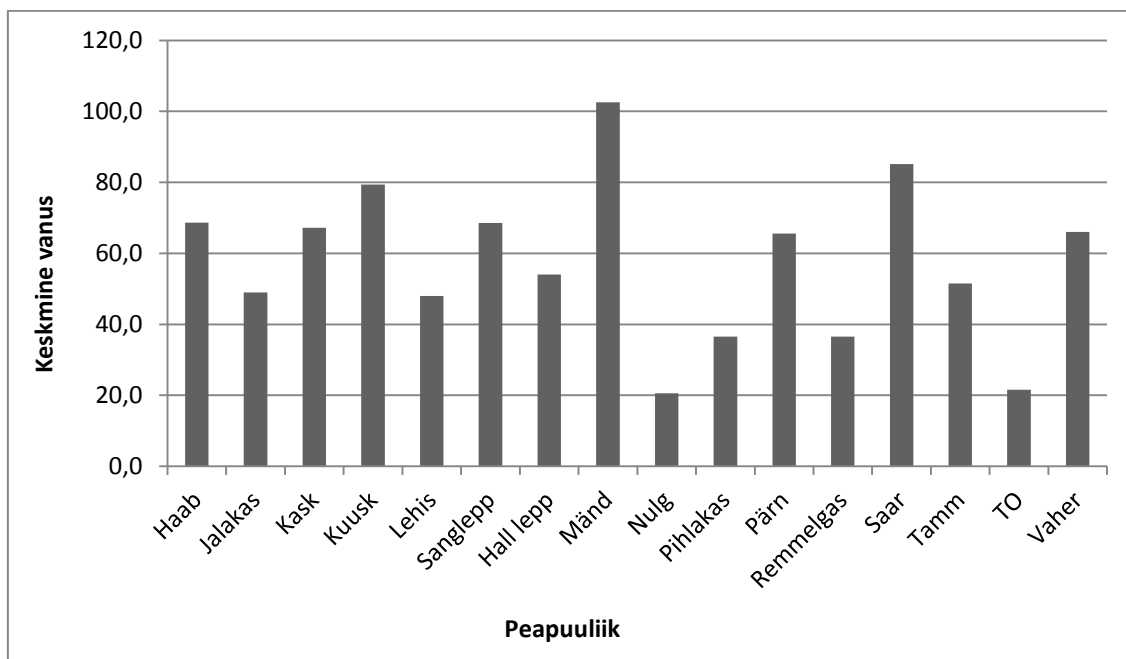
**Joonis 19.** Esimese rinde puistute liigiline koosseis 70M neelualal

Teises rindes (joonis 20) on esindatud 181 puistut, millest üle poole, 116 puistut, moodustavad kuusikud. Neile järgnevad pärn, vaher, kask, sanglepp, saar, künnapuu, hall lepp, nulg ning tamm.



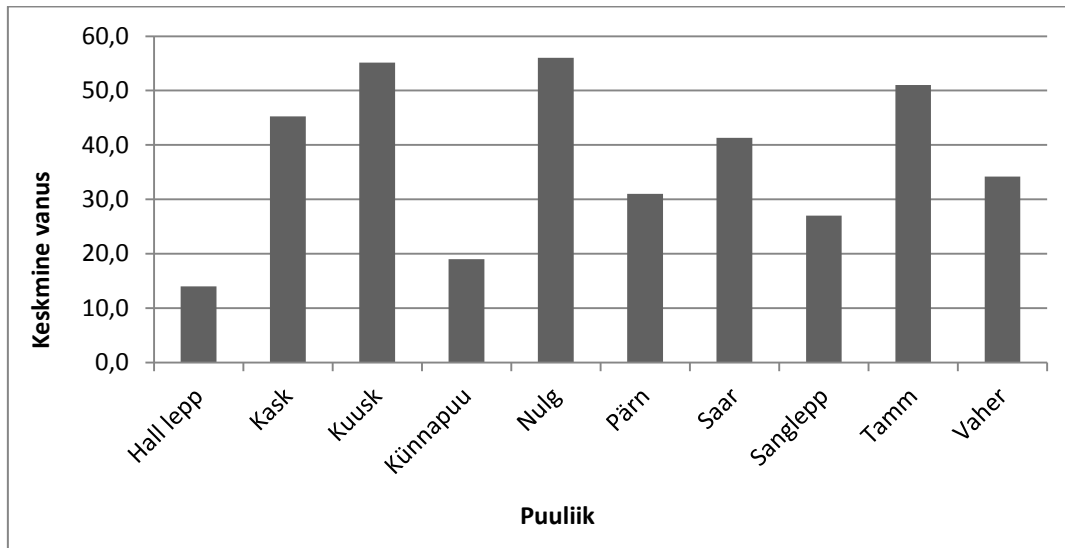
**Joonis 20.** Teise rinde puistute liigiline koosseis 70M neelualal

Esimese rinde kõikide puistute keskmine vanus on 57,5 aastat. Puuliikide järgi on kõrgeima keskmise vanusega männid (102,5 aastat), saared (85,2 aastat) ja kuused (79,4 aastat) ning noorimad puistud on nulul ja teistel okaspuudel (TO) (joonis 21).



**Joonis 21.** 70M neeluala esimese rinde puistute keskmine vanus puuliikide kaupa

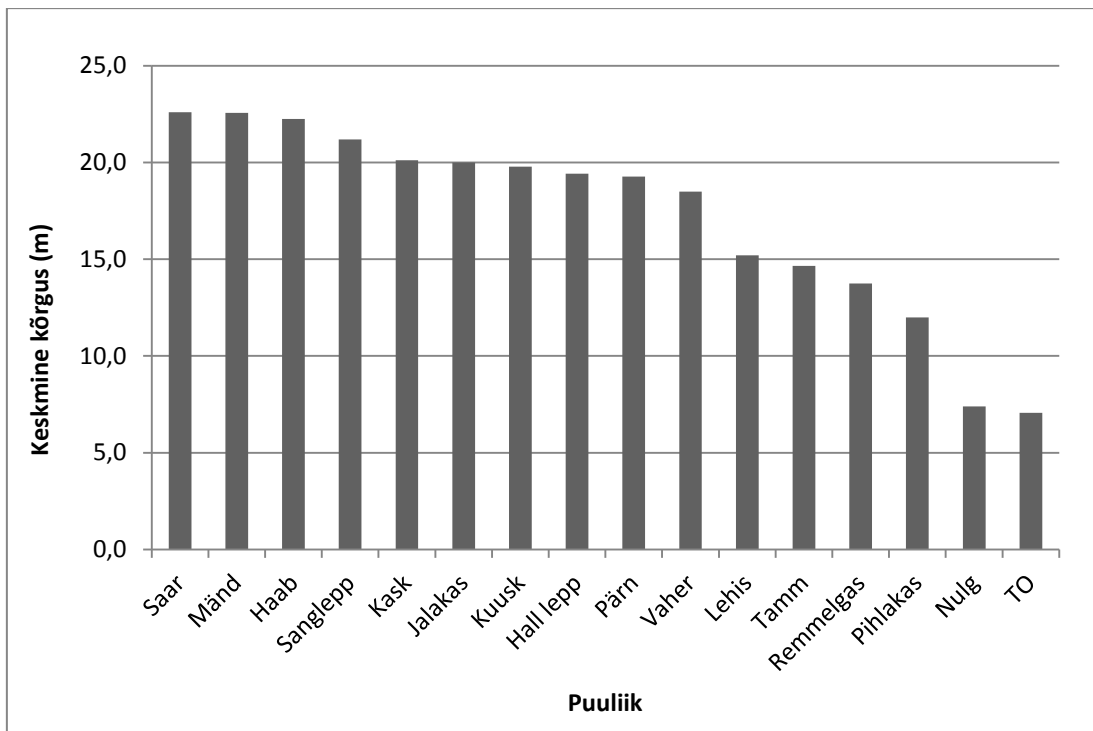
Teise rinde kõikide puistute keskmine vanus on 37,4 aastat. Kõrgeima keskmise vanusega on nulud (56 aastat) ning madalaimaga halli lepa enamusega puistud (14 aastat) (joonis 22).



**Joonis 22.** 70M neeluala teise rinde puistute keskmine vanus puuliigi kaupa

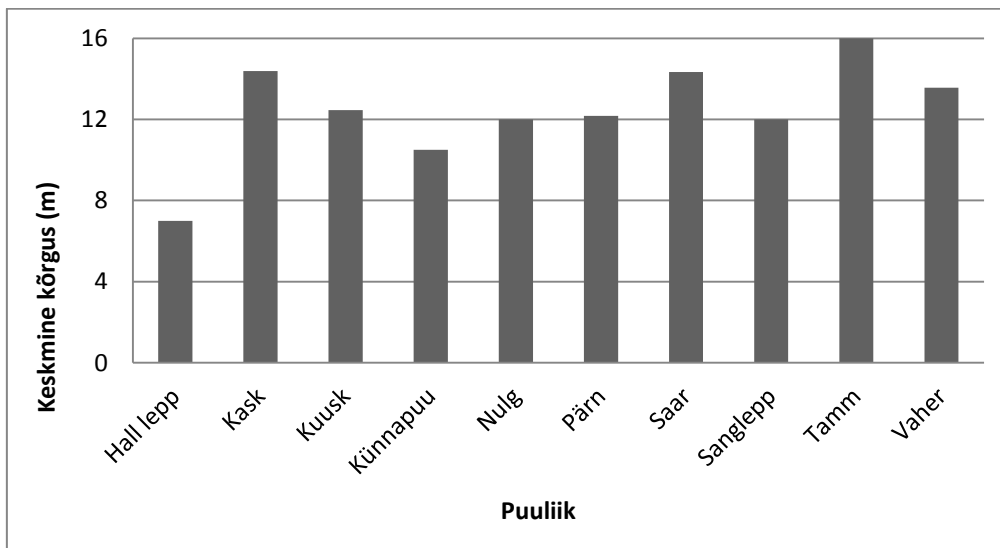
Esimese rinde puistute keskmine kõrgus on 17,2 meetrit (joonis 23). Kõige kõrgemad on männi ja saare puistud – mõlema keskmine kõrgus on 22,6 meetrit. Järgnevad haab (22,3 meetrit) ning sanglepp (21,2 meetrit). Väikseima keskmise kõrgusega on noored nulu ja teiste okaspuude puistuelemendid.





**Joonis 23.** 70M neeluala esimese rinde puistute keskmine kõrgus puuliikide järgi

Teise rinde kõikide puistute keskmine kõrgus on 12,4 meetrit (joonis 24). Kõige kõrgemad on tamme (16 meetrit) ja kase (14,4 meetrit) puistud. Lühimad keskmised kõrgused kuuluvad halli lepa (7 meetrit) ning künnapuu (10,5 meetrit) puistutele.



**Joonis 24.** 70M neeluala teise rinde puistute keskmine kõrgus puuliikide järgi

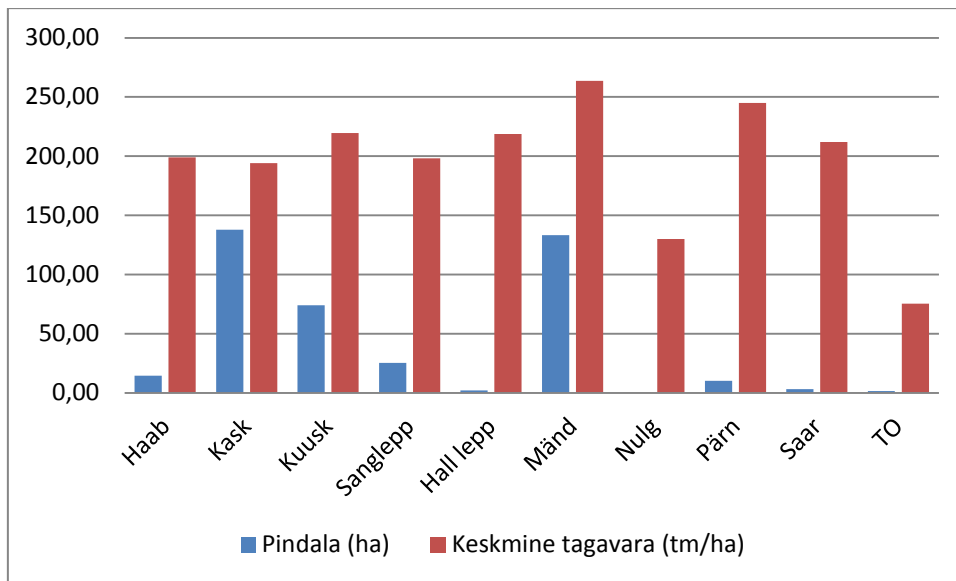
Keskmine tagavara (tm/ha) on arvatatud kogu neelualas olevate puistuelementide peale, peale esimese ja teise rinde on arvesse võetud ka üksikpuude rinne, surnud puit ja lamapuit (vt tabel 8). Kogu tagavara kokku on 89675 tihumeetrit, sellest ~40% moodustavad männi

enamusega puistud, mille tagavara kokku on 35126 tm. Pea 30% kogu peapuuliikide tagavarast moodustavad kaasikud tagavaraga 26744 tm. Väikseima tagavaraga on nulus, teised okaspuud ja halli lepa enamusega puistud.

**Tabel 8.** 70M neeluala puistute pindala ja tagavara peapuuliigi järgi

<b>peapuuliik</b>	<b>pindala (ha)</b>	<b>esimene rinne (tm)</b>	<b>teine rinne (tm)</b>	<b>üksikpuude rinne (tm)</b>	<b>surnud puit (tm)</b>	<b>lamapuit</b>	<b>keskmise tm/ha</b>
Haab	14,4	2717,5	27,8	105,1	3	7,2	199
Kask	137,8	24324,1	1676,7	419,4	191,7	132,6	193,9
Kuusk	74	14182,1	816,3	719,	284,2	251,1	219,6
Lehis	0,10	0	0	0	0	0	0
Sanglepp	25,3	4804,5	150,5	26,4	3	33	198,2
Hall lepp	2	354,8	16,8	0	0	66	218,8
Mänd	133,3	33133,4	1650,3	144,7	101,7	95,8	263,5
Nulg	0,10	13	0	0	0	0	130
Pärn	10,1	2304,9	132,3	27	8,3	0,90	244,9
Saar	3	540	51	0	30	15	212
TO	1,5	113,1	0	0	0	0	75,4
<b>Kokku</b>	<b>401,7</b>	<b>82487,5</b>	<b>4521,6</b>	<b>1442,5</b>	<b>621,9</b>	<b>601,7</b>	<b>223,3</b>

Suurima keskmise hektaritagavaraga puistuteks on männikud, mille tagavara on 263,5 tm/ha. Järgnevad pärna enamusega puistud tagavaraga 244,9 tm/ha ning kuusikud keskmise tagavaraga 219,6 tm/ha. Kõige väiksema keskmise tagavaraga, 75,4 tm/ha, on teiste okaspuude puistud. Keskmised tagavarad koos kogupindaladega puuliikide järgi on välja toodud joonisel 25.



**Joonis 25.** 70M neeluala puistute pindala ja keskmine tagavara peapuuliikide järgi

## 4. ARUTELU

Neeluala kujunemist mõjutavad mõõtmisjaama kõrgus, pinna kareduse ning termilise stabiilsus. Neeluala ei ole kunagi fikseeritud, vaid tuleb pidevalt sõltuvalt mõõtmisandmetest ümber arvutada.

Uurimisjaama neelualal olevate metsade majandamise seisukohast on oluline teada, kui suur osa aladest on kaitsealuseid metsi. Metsa majandamine mõjutab SMEAR jaama mõõtmisandmeid koguaeg. Antud töös uuritud neelualadele jäävatest eraldistest oli 34,2% kaitsealuste piirangutega. Kogu kaitse all olevast alast jääb 69,36 hektarit kaitseala sihtkaitsevööndi, 43,01 hektarit piiranguvööndi ning 30,23 hektarit alast jääb veekogu ranna või kalda piiranguvööndi. Tootlikust metsamaast on 35,20% alast kaitse all, mis kitsendab metsa majandamise planeerimist. Lisaks on SMEAR jaama mastidel oma nullnivoo hoidmise alad (Apna mastil 500m raadiusega ja väikestel mastidel 100m raadiusega), mille sees uuendusraied ei kavandata.

Põhiline küsimus on, mis viisil majandada neelualal olevaid metsaalasid nii, et see oleks võimalikult jätkusuutlik, võttes arvesse ka SMEAR jaama töö seisukoha. Uuendusraied tehes tekivad metsade sisse häilud, mis omakorda muudavad neeluala arvestuslikku pinna karedust – turbulents ja väiksemad vertikaalsed õhuvood hakkavad liikuma maharaiutud alade sees. Pinna kareduse pideval muutumisel on mõjutatud neeluala arvutamine tulevikus. Oluline on jälgida homogeensete gruppide järgi, et neeluala nullnivoo arvutus arvestaks neeluala enda pidevat muutust.

Ideaalis oleks puu võrade tasapind püsiv piirkareduse järgi, kuid seda ei saa igal pool rakendada. Näiteks männi enamusega puistutes saab kasutada püsimetsanduse põhimõtet – männi puistud on ka käesolevas töös uuritud neelualadel kõige suurema keskmise tagavaraga hektari kohta ja ühe suurima pinnaga.

Püsimetsandus on Eestis võrdlemisi vähelevinud metsa majandamise viis. Võrreldes klassikalise lageraie metoodikaga, on metsa püsimetsana majandamisel suurimaks erinevuseks see, et metsa ei raiuta kunagi tervikuna korraga lagedaks. Püsimetsas kasvavad puud on vanuseliselt varieeruvad ja ideaalis leidub kasvamas igas arenguetapis olevaid

puid. Püsimetsas on samuti üheks eesmärgiks puude liigiline mitmekesisus ja metsa kasvatamine segametsadena, kus orienteerumine ei ole ainult ühele puuliigile (Pukkala 2012).

Neeluala hindamise seisukohast aitab püsimetsana majandamine vältida vertikaalsetest langiservadest tingitud täiendava turbulentse õhuvoo teket, kuid viiks oluliselt teistsuguseks nullnivoo asukoha, kuna avatud võrapind ja suurem keskmine puude vaheline kaugus lubab õhul liikuda oluliselt sügavamale puude võrade sisse.

## KOKKUVÕTE

Magistritöös on kirjeldatud nii Eesti SMEAR jaama olemust ja tööpõhimõtteid kui ka neelualade moodustumist, turbulentse kovaratsiooni meetodit ning analüüsitud millised puistud jäävad antud mõõtmisvahemikul kujunevate neelualade sisse.

Elektrooniliste seadmete abil saavad teadlased jälgida kliimamuutuse mõjusid. SMEAR Eesti jaamas saab mõõta, milliseid aineid emiteerivad taimed oma elutegevusega õhku ning kuidas õhus sisalduv omakorda taimi mõjutab. Samuti saab mõõta veeauru, metaani ja süsinikdioksiidi voogusid. Eesti SMEAR jaam kuulub põhjamaade SMEAR-võrgustikku koos Soomes asuva nelja SMEAR jaamaga.

Uurimisjaamas kasutatav turbulentse kovariatsiooni meetodi kasutuselevõtt metsaökosüsteemide muutumise uurimiseks loob võimaluse määrata kasvuhoonegaaside baasnivoo ja sellega toimuvad muutused. Selle meetodiga on võimalik hinnata kasvuhoonegaaside, veeauru jm ökosüsteemi-atmosfääri vahelisi seoseid. Kliimamuutused ja neist tulenevad protsessid kahandavad metsade süsiniku varusid, seega kõrgtasemel tehtud uuringud on väga vajalikud.

Käesoleva töö tulemuste osaks oli kirjeldada neelualal paiknevaid eraldisi. Tulemustest ilmeneb, et neelualale jäid männi, kase ja kuuse enamusega puistud. Neelualal olevate esimese rinde puistuelementide keskmine vanus on 70M neelualal 57,5 aastat ning teises rindes 37,4 aastat, 30M neelualas jäid vanused vastavalt 85 ja 52 aastat. Mõlemal neelualal on suurim tagavara männikutel. Neelualal masti vahetus läheduses paiknevaid metsi võiks tulevikus majandada püsimetsa majandamis põhimõtete järgi – sellisel juhul ei tekiks neelualale suuri häile, mis omakorda tekitaksid täiendavaid turbulentseid õhuvoole.

Töö tulemusena on välja töötatud metoodika neelualale jäävate metsaeraldiste valikuks kasutades selleks mõõtmistulemustest arvatud neeluala signaale. Seda metoodikat on võimalik kasutada vastavalt vajadusele erinevatel ajaperioodidel olnud neeluala hindamiseks. Töö tulemusi saab kasutada nn dünaamilise neeluala arvutuse jaoks.

Praeguseks on SMEAR jaamade mitmekümne aasta pikkuste uuringutega saadud palju uusi teadmisi nii muutuvates ilmastikuoludes ökosüsteemide käitumise kui ka kasvavate kasvuhoonegaaside sisalduste kohta. Regulaarsed pikaajased mõõtmised on vajalikud nii oleviku hindamiseks kui tuleviku ennustamiseks.

## VIIDATUD ALLIKAD

**Baldocchi, Dennis D.** (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. Nr.9, lk.479-492.

**Burba, G., Anderson, D.** (2010). A brief practical guide to eddy covariance flux measurements. Lincoln: LI-COR Biosciences. 213 lk.

**Burba, G., Madsen, R., Feese, K.** (2013). Eddy Covariance method for CO<sub>2</sub> Emmission Measurements in CCUS Applications: Principles, Instrumentation and Software. *Energy Procedia* nr 40, lk 329-336.

**Collins, M.** (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, lk 1029-1136.

**Davenport, A.G.,** (1960). Rationale for determining design wind velocities. Journal of the Structural Division, *American Society of Civil Engineers*, 86, lk. 39–68.

**Eerme, K.** (1997). Sissejuhatus geofüüsikasse. Tartu Ülikooli keskkonnanäüüsika instituut, lk 87. Tartu, 1997

Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. *WMO*-No.8. ISBN 978-92-63-100085

**Hari, P., Kulmala, M.** (2005). Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations (SMEAR II). – *Boreal Environment Research*, 10, lk 315–322.

**Jain, A.** (2009). Global warming and climate change. *Atmospheric science for environmental scientists*. Wiley-Blackwell, pp 268-271.

Järvelja Metsamajandmise Infosüsteem. [veebileht/] <https://jarvelja.emu.ee/> (05.04.2018)

**Kljun, N., P. Calanca, M. W. Rotach, and H. P. Schmid.** (2004). A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary Layer Meteorology*, 112: 503-523.



**Korjus, H., Põllumäe, P., Kangur, A.** (2015). Why do we need a research and demonstration area of forest management planning at Järvselja? – *Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused* 63, 151–159. ISSN 1406-99

**Leclerc, M.Y., and G.W. Thurtell.** 1990. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology* 52: 247-258

Maa-ameti geoportaal. [veebileht] <http://geoportaal.maaamet.ee/> (12.04.2018)

**Metsaranta, J.M., Lieffers, V.J.** (2009). Using dendrochronology to obtain annual data for modelling stand development: a supplement to permanent sample plots, lk 163-173

**Niinemets Ü.** (2018). Professor Ülo Niinemets: kas 20 miljardit tuleviku ennustamiseks on tõesti liiga palju? – *Heureka, Postimees*. [e-ajakiri] <https://heureka.postimees.ee/4386115/professor-ulo-niinemets-kas-20-miljardit-tuleviku-ennustamiseks-on-toesti-liiga-palju> (27.05.2018)

**Noe S. M., Kimmel V., Hüve K., Copolovici L., Portillo-Estrada M., Püttsepp Ü., Jõgiste K., Niinemets Ü., Hörtnagl L. & Wohlfahrt G.** (2011). Ecosystem-scale biosphere –atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia. – *Forest Ecology and Management* lk 71–81.

**Noe, S.M., Krasnova, A., Krasnov, D., Kangur, A.** (2015). Eesti SMEAR-jaama andmete kasutus jätkusuutliku biomassi tootmise jälgimisel. *TEUK XVII - Taastuvate Energiaallikate Uurimine ja Kasutamine*, Tartu, Estonia, lk 104–110.

**Noe, S.M., Niinemets, Ü., Krasnova, A., Krasnov, D., Motallebi, A., Kängsepp, V., Jõgiste, K., Hõrrak, U., Komsaare, K., Mirme, S., Vana, M., Tammet, H., Bäck, J., Vesala, T., Kulmala, M., Petäjä, T., Kangur, A.** (2015). SMEAR Estonia: Perspectives of a large-scale forest ecosystem – atmosphere research infrastructure. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 63, 56–84.

**Pukkala, T., von Gadow, K.** (2012) Continuous Cover Forestry: Managing Forest Ecosystem. Second Edition. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer. 291 lk

**Rebmann, C., Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, C., Carrara, A., Cescatti, A., Ceulemans, R., Clement, R., Elbers, J.A., Granier, A., Grünwald, T., Guyon, D., Havrankova, K., Heinesch, B., Knohl, A., Laurila, T., Longdoz, B., Marcolla, B., Markkanen, T., Miglietta, F., Moncrieff, J., Montagnani, L., Moors, E., Nardino, M., Ourcival, J.-M., Rambal, S., Rannik, Ü., Rotenberg, E., Sedlak, P., Unterhuber, G., Vesala, T., Yakir, D.** (2005). Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling .Nr.80, lk.121-141

**Schuepp, P.H., M.Y. Leclerc, J.I. Macpherson, and R.L. Desjardins** (1990). Footprint Predictions of Scalar Fluxes from Analytical Solutions of the Diffusion Equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50, lk 355-373

SMEAR koduleht (s.a.). [veebileht] <https://www.atm.helsinki.fi/SMEAR/index.php/smea-1> (23.05.2018)

SMEAR Estonia koduleht (s.a.). [veebileht] <http://smea.emu.ee/index.php> (27.05.2018)

SMEAR Eesti uurimisjaam. SA Järvselja Õppe-ja Katsemetskond koduleht. Metsanduslik katsetöö. [veebileht] <http://jarvselja.ee/sihtasutusest/teadustoo/metsanduslik-katsetoo/> (20.04.2018)

**Tang, J., Baldocchi, D.D., Xu, Y.Q.L.** (2003). Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*. Nr.118, lk.207-220.

**Vesala, T., Kljun, N., Rannik, Ü., Rinne, J., Sogachev, A., Markkanen, T., Sabelfeld, K., Foken, Th., Leclerc, M.Y.** (2008). Flux and concentration footprint modelling: State of the art. *Environmental Pollution*, nr 153 (3) lk 653-666.

**Wang, W., Davis, Kenneth J.** (2008). A numerical study of the influence of a clearcut on eddy-covariance fluxes of CO<sub>2</sub> measured above a forest. Nr.148, lk.1488-1500.

**LISAD**

## Lisa 1. Anemomeeter METEK uSonic Class A



Pilt Metek koduleheküljelt

## Lisa 2. Gaasianalüsaator IRGASON



Pilt Campbell Scientific koduleheküljelt

### Lisa 3. Skript neelualade arvutamiseks

```
dir()

#Loen andmestiku sisse
fp70=read.csv("footprint70.csv", header = TRUE, sep = ",")
head(fp70)
nrow(fp70)

#Eemaldan puuduvad väärtused
proov1=fp70[!is.nan(fp70$x_90),]
nrow(proov1)

#Lisan SMEAR-masti x ja y koordinaadid
proov1$xv=(694022.3)
proov1$yv=(6464443.0)

#Arvutan neeluala punktid
proov1$x=with(proov1,xv+x_90*sin(pi*wd/180))
proov1$y=with(proov1,yv+x_90*cos(pi*wd/180))

#Jagan mõõtmiste perioodi kuueks
seq(1,6,by=1)
c(1:6)
proov1$id=(c(1:6))
nrow(proov1)/6
4609*6
proov2=tail(proov1,-5)
nrow(proov2)
proov2$id=as.integer(c(1:length(proov2$x))/6)
View(proov2)

#Salvestan tekkinud andmestikku csv-formaati
write.csv(proov2, file = "points3.csv")

# 30 meetri kõrguselt
#Loen andmestiku sisse
fp30=read.csv("footprint30.csv", header = TRUE, sep = ",")
head(fp30)
nrow(fp30)

#Eemaldan puuduvad väärtused
fp30proov=fp30[!is.nan(fp30$x_90),]
nrow(fp30proov)

library(foreign)

#Lisan SMEAR-masti x ja y koordinaadid
fp30proov$xv=(694022.3)
fp30proov$yv=(6464443.0)
```

```

#Arvutan neeluala punktid
fp30proov$x=with(fp30proov,xv+x_90*sin(pi*wd/180))
fp30proov$y=with(fp30proov,yv+x_90*cos(pi*wd/180))
head(fp30proov)

#Jagan mõõtmiste perioodi kuueks
seq(1,6,by=1)
c(1:6)
fp30proov$nid=(c(1:6))
nrow(fp30proov)/6
6743*6
pr3=tail(fp30proov,-4)
nrow(pr3)
pr3$nid=(c(1:6))

pr3$nid=as.integer(c(1:length(pr3$x))/6)
View(pr3)

#Salvestan tekkinud andmestikku csv-formaati
write.csv(pr3, file = "fp30m.csv")

```

**Lihthitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Sandra Saar,

Sünniaeg 28.08.1991,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihthitsentsi) enda loodud lõputöö

SMEAR Eesti seirejaama põhimasti neelualade analüüs ja puistute kirjeldus

mille juhendajad on Ahto Kangur ja Steffen Manfred Noe,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihthitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(kuupäev)

---

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)